

# 介质阻挡放电对甲烷离解及燃烧火焰的影响

丁玉柱, 夏胜国, 王琼芳, 姜春阳, 韩文, 何俊佳

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## Effect of Dielectric Barrier Discharge on Methane Dissociation and Combustion

DING Yuzhu, XIA Shengguo, WANG Qiongfang, JIANG Chunyang, HAN Wen, HE Junjia

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Dielectric barrier discharge (DBD) enhanced combustion is a new application in plasma technology field. The active species in fuel or fuel air mixtures plasmas generated by DBD can influence the chemical kinetics of combustion and improve combustion properties considerably. In this paper, the emission spectrum of discharge area and flame was measured, and the flame structure was recorded. The experiment results showed that the radical of CH and H were produced by DBD in methane, and the optical emission spectrum line intensities of radical CH in the flame increased with voltage. Flash-back phenomenon was observed under some certain conditions. CFD software Fluent was used to investigate the effect of radicals of CH and H on methane combustion. And the simulation results agreed well with experiment results. It is concluded that the improvement of combustion property is contributed to radicals of CH and H produced by DBD in methane.

**KEY WORDS:** dielectric barrier discharge (DBD); methane; enhanced combustion; spectrum line; flash-back phenomenon

**摘要:** 介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)燃烧强化是等离子体技术领域发展起来的新的应用途径。在未燃烧的气体燃料或者可燃混合气体中进行 DBD, 利用放电产生的活性自由基, 影响燃烧系统的化学平衡, 进而达到改善燃料燃烧特性的目的。采用光谱仪分别对放电间隙和燃烧火焰进行光谱测量, 并对燃烧的火焰形态进行记录。实验结果表明, 甲烷放电后离解生成了 CH 基和 H 基, 放电电压增加, CH 基对应的光谱强度相应增加; 放电处理后的甲烷燃烧火焰主要组成成分发生变化; 在一定放电条件下, 火焰产生回火现象。利用 Fluent 仿真软件研究了 CH 基和 H 基对

甲烷燃烧的影响, 仿真结果与实验结果吻合。研究认为甲烷燃烧特性的改善是 DBD 使甲烷离解生成的 CH 基和 H 基造成的。

**关键词:** 介质阻挡放电; 甲烷; 燃烧强化; 光谱; 回火现象

## 0 引言

介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)是在大气压条件下产生非平衡等离子体的常用方法<sup>[1]</sup>, 在等离子体化学、材料表面处理、环境保护以及生物灭菌消毒等工业领域具有广阔的应用前景<sup>[2-7]</sup>。燃烧强化是介质阻挡放电的一种新的应用, 是在未燃烧的气体燃料或者可燃混合气体中进行介质阻挡放电, 利用产生的非平衡等离子体的化学活性, 影响燃烧的化学平衡, 加速燃烧的化学动力学过程, 从而提高燃料的点火性能<sup>[8]</sup>、燃烧速度和稳定性等燃烧特性的一种技术。

Starikovskii A Yu<sup>[9]</sup>等人的研究表明, 脉冲纳秒放电下的丙烷/空气混合气体的火焰吹灭速度是正常火焰的 2 倍, 而输入的放电能量不到燃烧能量的 1%。吹灭速度可认为是燃烧强化的一种体现。Stange S<sup>[10-11]</sup>等利用 DBD 放电在丙烷-空气中研究了燃烧强化, 结果表明放电情况下的燃料和产物有很大的不同, 主要是由于放电对丙烷进行活化产生的非平衡等离子体引起的。非平衡等离子体中某些活性成分是燃烧强化的关键。兰宇丹<sup>[12-14]</sup>对等离子体燃烧强化进行了数值仿真研究, 结果表明等离子体可强化燃烧, 使燃烧更稳定, 燃烧温度更高。

国内外对于放电燃烧强化的研究还处于实验探索阶段, 燃烧强化机制没有一致的理论。本文以甲烷离解的产物(CH 基和 H 基)等燃烧强化关键活

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777027)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50777027).

性成分为研究对象, 研究放电等离子体对燃烧强化的影响, 探索非平衡等离子体燃烧强化的机制。对甲烷燃料进行介质阻挡放电处理, 并测量甲烷 DBD 放电光谱、燃烧火焰光谱以及火焰形态。利用 Fluent 仿真软件研究了甲烷主要离解产物 CH 基和 H 基对甲烷燃烧火焰的影响, 结合实验和仿真结果分析了介质阻挡放电对甲烷燃烧强化的影响机制。

## 1 实验装置

实验平台如图 1(a)所示, 放电装置的结构如图 1(b)。放电器采用同轴结构, 由金属铜管、石英玻璃管和紫铜薄皮组成。金属铜管自身作为内电极, 管内通入空气, 其内、外半径分别为 3.25 和 5 mm; 石英玻璃管为阻挡介质, 内、外半径分别为 8 和 10 mm; 紫铜薄皮包裹于石英玻璃管外壁, 构成外电极, 其长度为 70 mm。石英玻璃管内壁与金属铜管外壁之间相对于紫铜薄皮的区域为放电区。在放电区上方保留 50 mm 的区域用于甲烷和空气的混合, 称为混合区。实验时, 高频交流电压作用于放电器内外电极, 放电区内通入的气体被活化。然后活化气体在混合区与空气混后, 在石英管口点燃。

高频交流电源装置输出的频率范围为 5~20 kHz, 最大输出电压可达 30 kV<sup>[16]</sup>。甲烷和空气的流速由流量计控制; 放电电压、电流分别由高压探头 (Tektronix P6015A) 和回路中的取样电阻测量; 电压/电流波形由数字示波器 (Tektronix TDS3054, 500 MHz) 记录; 燃烧的火焰形态采用数码照相机 (Kodak EasyShare Z730, 500 万像素, 最小曝光时间 1 ms) 拍摄; 放电区和燃烧火焰光谱由光谱仪测量。光谱仪为美国 Ocean Optics 公司生产, 型号为 USB 2000+, 最小时间分辨率为 1 ms, 波长范围

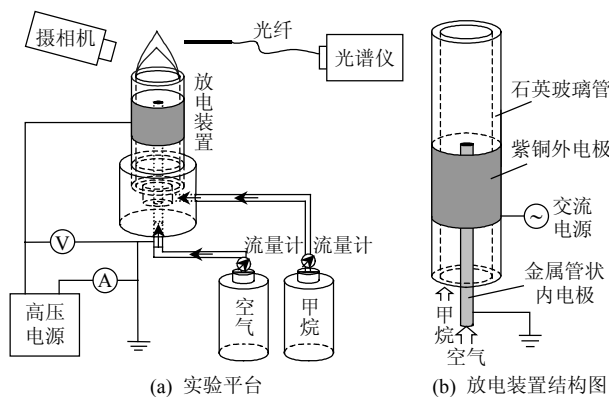


图 1 实验装置

Fig. 1 Experiment setup

为 173.42~886.96 nm。

放电电压和电流波形如图 2 所示。电流波形在每半周有许多细丝脉冲, 放电为典型丝状放电形式<sup>[17]</sup>。电流波形中的脉冲细丝的数量在正、负周期不一致, 这是因为在电压正、负周期放电发展方向相反, 而放电由内电极向外电极发展更容易的缘故。

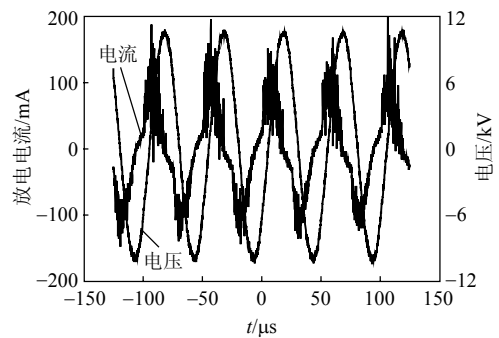


图 2 放电电压/电流波形

Fig. 2 Waveform of discharge current and voltage

## 2 实验结果及分析

### 2.1 甲烷放电区 CH 基的光谱测量

甲烷经过放电处理后, 受到放电通道内高能电子的碰撞, 离解生成新的活性成分。通过对放电区域的光谱测量, 分析各波峰下谱线对应的物质, 可测量出甲烷的离解产物。本文进行了 4 和 8 kHz 2 种频率下的实验, 电压范围从开始放电至 13 kV。为了与空气放电进行比较, 放电气体分为空气、甲烷/空气混合气和甲烷 3 种情况。

图 3 给出了 12 kV 时不同放电气体对应的放电区光谱图。图 3(a)中, 放电光谱的范围集中在 300~450 nm。空气、甲烷/空气混合气放电时的光谱主要为氮气分子第二正带系 N<sub>2</sub>SPS(second positive system, SPS)系列谱线<sup>[18]</sup>。甲烷放电光谱中还含有少量 N<sub>2</sub> 谱线, 主要由配气系统中掺杂的少量空气造成。甲烷/空气混合气放电光谱与纯空气相比, N<sub>2</sub>SPS 系列光谱强度要低很多, 可能是甲烷/空气混合气中一部分激发的 N<sub>2</sub> 分子与甲烷碰撞后回到了低能态的原因。图 3(b)为放电区波长 420~440 nm 的光谱。从图中可看到, 甲烷、甲烷/空气混合气体放电光谱在波长  $\gamma=431$  nm 处都出现一个峰值, 而此峰值在空气放电光谱却没有出现。波长  $\gamma=431$  nm 对应着甲烷离解的产物 CH 基的特征光谱, 可知甲烷经过放电后生成了 CH 基。除此, 甲烷/空气所对应的 CH 基谱线峰值比纯甲烷高, 说明甲烷离解生成

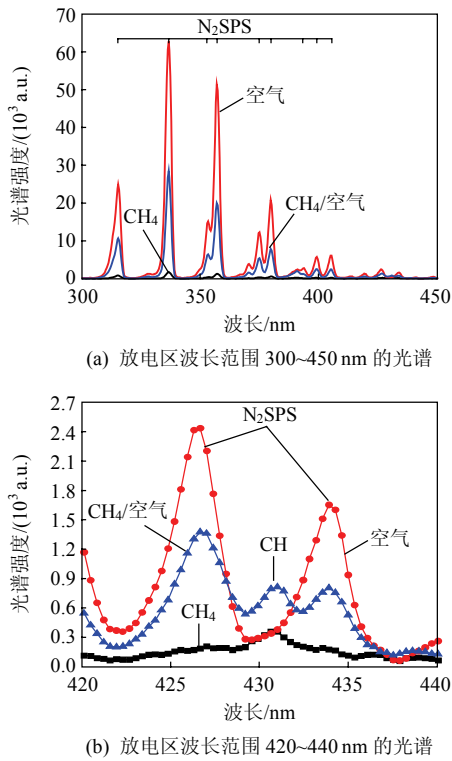


图3 电压12 kV时放电区的光谱波形

Fig. 3 Comparison of emission spectra in the discharging area at voltage of 12 kV

CH基的能力没有甲烷/空气混合气体强。原因是甲烷/空气混合气通过放电区时，N<sub>2</sub>容易被激发达到高能态 N<sub>2</sub>(C<sup>3</sup>Πμ)，其激发态能量大于 11.0 eV，高于甲烷离解能，可以使甲烷离解。

图4为甲烷放电离解后CH基光谱强度随电压及频率的变化波形。从图中可以看出：随着电压升高，放电区CH基的特征光谱强度增大；外加频率增加，放电区CH基的光谱强度曲线整体上移。频率8 kHz下CH基的光谱强度约为4 kHz下的2倍。这说明甲烷离解生成CH基的能力随着电压和频率

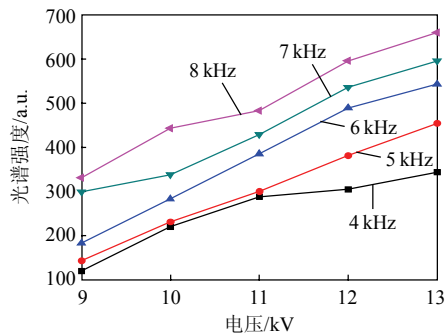
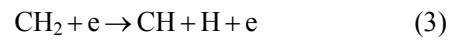
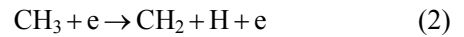
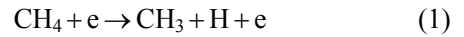


图4 放电区CH基光谱强度随电压和频率的演变

Fig. 4 Evolution of spectra intensity of CH radical in the discharging area with applied voltage and frequency

的增加而增强。

甲烷的C-H键的键能为4.51 eV，因此断裂一个C-H键所需的电子能量要大于4.51 eV。甲烷离解生成CH基的方程式如下<sup>[19-20]</sup>：



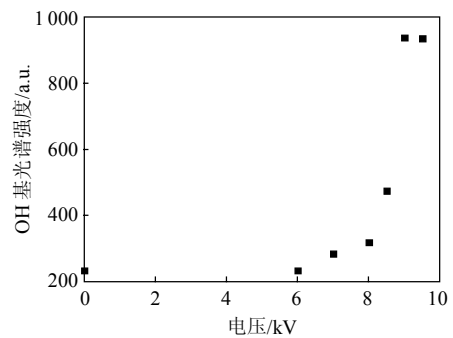
从式(1)–(3)可以看出，甲烷离解与电子能量和高能电子数目相关，电子能量大小和数目又与外部激励电源相关。因此，电源输入电压越大，频率越高，单位时间内的微放电次数越多，放电区内产生的高能电子的数目也就越多。甲烷离解的程度越强，生成的CH基越多，放电区内CH基的光谱强度也越大。

## 2.2 甲烷燃烧火焰的光谱及形态测量

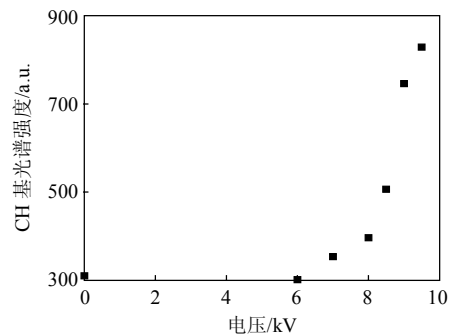
### 2.2.1 放电参数甲烷火焰光谱的影响

通过对放电/未放电情况下甲烷火焰光谱的测量，研究了火焰内OH、CH基等中间产物的变化规律。测量中，当频率为4和8 kHz时，火焰光谱的测量结果大致相同，这里只讨论4 kHz的情况。

图5为火焰内OH、CH基光谱强度随外加电压



(a) 火焰内OH基光谱强度随电压演化



(b) 火焰内CH基光谱强度随电压变化

图5 4 kHz下火焰内OH/CH光谱强度随电压的变化

Fig. 5 Evolution of spectra intensity of OH/CH radical in the flame with applied voltage at 4 kHz

变化的曲线。放电的起始电压为 6 kV。图中电压为 0 表示甲烷燃烧前未经过放电处理的情况。从图 5 可以看出, 在放电开始阶段, 火焰内 OH、CH 基的光谱强度与未放电的情况大体相同。随着电压增加, 火焰内 OH、CH 基浓度也随之增加, 光谱强度增加最明显的电压范围为 8~9.5 kV。这是因为起始放电阶段, 单位时间内微放电次数很少, 甲烷离解程度很低。随着电压的升高, 甲烷离解程度加强, 生成的 CH、H 基也会增加。

### 2.2.2 放电参数对甲烷火焰形态的影响

在火焰形态拍摄中, 电压升至 10 kV 时, 观察到火焰变得不稳定, 火焰根部在进气管口上下跳跃。随着外加电压进一步增加, 火焰根部开始进入喷嘴。将这种火焰进入喷嘴的现象称为回火。

图 6 是频率为 8 kHz 时不同电压下火焰形态的变化。在电压 10 kV 时, 火焰根部部分进入喷嘴。电压达到 10.4 kV 时, 火焰根部完全进入喷嘴。电压进一步地增加, 达到 12.4 kV 时, 火焰大部分伸入喷嘴, 只有少部分在喷嘴外燃烧。可以认为, 随着外加电压的升高, 甲烷燃烧的回火现象越明显。频率 4 kHz 下甲烷燃烧火焰形态变化与 8 kHz 时大致相同, 只是回火出现时电压略高一些。

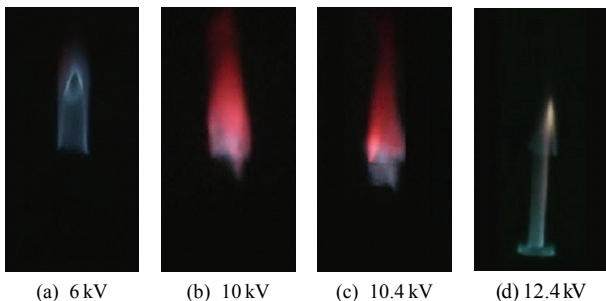


图 6 不同电压下的火焰形态

Fig. 6 Flame shapes under different voltages

关于回火, 目前没有统一的解释。美国 Stange<sup>[8]</sup>在丙烷气体放电燃烧强化实验研究中, 对此现象的解释是放电使燃烧的火焰传播速度变大。根据燃烧学火焰稳定原理, 只有当出口断面上的气流速度小于火焰传播速度时, 火焰才会向管内传播, 造成回火。这意味着经过放电处理后, 甲烷燃烧火焰的传播速度增加了。姜春阳<sup>[21]</sup>在进行 DBD 对甲烷燃烧影响的研究中认为, 由于放电区很强的边缘电场对非平衡等离子体中的粒子的行动有很大束缚, 这会加速非平衡等离子体与空气的混合, 改善燃料的混合状况, 因此最终导致回火。

## 3 放电对甲烷燃烧火焰影响的数值仿真

### 3.1 计算模型

为了研究甲烷的离解产物 CH 基是否是造成甲烷火焰回火的原因, 利用 Fluent 软件对 CH 基作用下的甲烷燃烧进行了数值仿真。考虑到甲烷离解生成 CH 基的同时伴随有 H 基生成, 对 H 基的影响也进行了数值仿真。

计算模型是一个二维轴对称模型, 对称轴是  $x$  轴。进口喷嘴半径为 5 mm, 长度为 10 mm。燃烧室半径为 200 mm, 长度为 390 mm。考虑到燃烧主要集中在对称轴周围, 因此在网格处理时对称轴附近的网格密度大, 而靠近壁面处的网格密度小。

Fluent 软件中在仿真边界条件设置时, 进口边界处经过放电处理后的甲烷空气混合气体, 假定已混合均匀。仿真时, 通过在进气口中添加一定浓度的 CH、H 基, 来研究 CH、H 基对甲烷燃烧火焰的影响。边界条件的设置如下: 进口气体为由  $O_2$  和  $N_2$  组成的理想空气,  $O_2$  含量为 21%。气体流量保持 1 m/s, 环境温度为 23 °C, 燃烧室壁面绝热, 温度为 23 °C, 无表面化学反应。

### 3.2 化学反应机制

甲烷燃烧的化学动力学过程很复杂, 实际反应机制包含 35 种组分、217 个基元反应。国际上常用的机制为 GRI-Mech3.0 反应机制, 去除涉及 N 元素的基元反应。但求解包含详细反应机制的流动守恒方程十分困难和费时, 本文中采用的甲烷燃烧化学机制为 Chemkin 软件内的简化机制, 涉及 C、H、O、N 这 4 种元素, 包括  $CH_4$ 、 $CH_3$ 、 $CH_3O$ 、 $CH_2O$ 、 $HCO$ 、 $CH$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $H$ 、 $HO_2$ 、 $H_2$ 、 $H_2O$ 、 $H_2O_2$ 、 $O$ 、 $OH$ 、 $O_2$  及  $N_2$  共 17 种成分, 可以满足活性基团 CH、H 对燃烧影响的研究。

### 3.3 仿真结果与分析

仿真结果中, 只在进口处检测到很少含量的 CH 基, 火焰内没有出现 CH 基。可能的原因是化学机制简单, 在此反应机制下 CH 基的生成速度小于消耗速度。因此, 对火焰组分变化的研究忽略 CH 基, 只考虑 OH 基。

图 7(a)、(b)分别为纯甲烷和添加含量 0.01% 的 H 基时甲烷燃烧火焰内 OH 基浓度的分布。比较两图可知, 燃料中加入 H 基之后, 火焰内 OH 基含量最大值增大, 而且 OH 基浓度分布区域向进口处靠拢。由于 OH 基浓度的分布与温度有关, 温度越高,

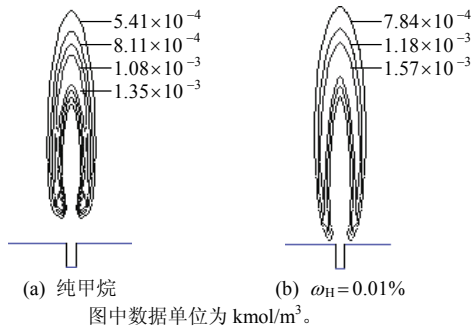


图7 Fluent 仿真中火焰内 OH 基浓度分布  
 Fig. 7 Simulation of OH radical concentration distribution in the flame

OH 基浓度越大，可以认为，甲烷中混入的 H 基增加了火焰温度，转移了火焰中心。

图 8 是火焰内 OH 基质量分数最大值随燃料内 CH 基、H 基质量分数变化的曲线。可知，随着 CH 基、H 基含量的增加，火焰内 OH 基的质量分数最大值增加。这与实验中火焰内 OH 光谱强度随放电电压增加的变化趋势是一致的。与纯甲烷燃烧相比，当进口中 H 基的质量分数达到 0.5% 时，火焰内 OH 基的质量分数增加了将近 1 倍。H 基质量分数达到 0.15% 时，火焰内 OH 基的质量分数增加了

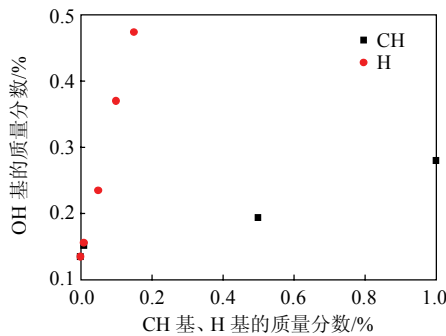


图8 Fluent 仿真中火焰内 OH 基质量分数随添加的 CH 基、H 基的质量分数的演化  
 Fig. 8 Simulation of evolution of OH mass fraction with CH and H of the fuel in the flame

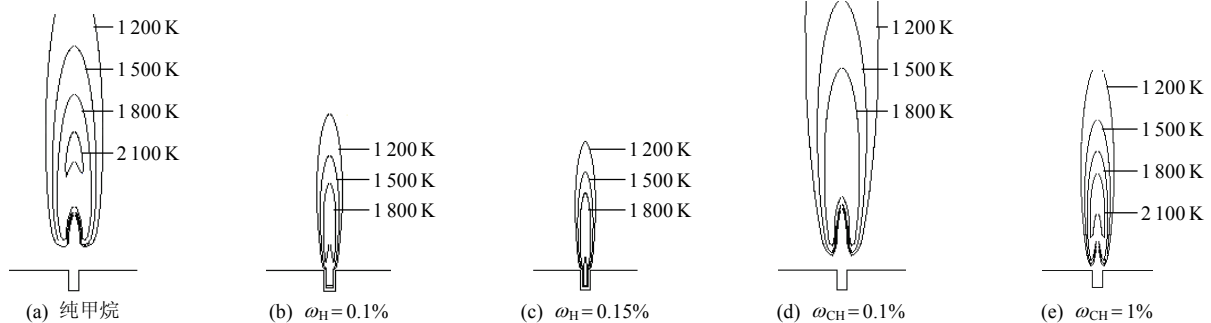


图9 Fluent 仿真中原料中添加不同浓度的 CH、H 时火焰等温图  
 Fig. 9 Simulation of isothermal structure of flame with different concentrations of CH and H in the fuel

大约 3 倍。这说明 H 基对火焰内 OH 基质量分数的影响比 CH 基明显。

图 9 是在进口处添加不同浓度 CH 基、H 基时，获得的仿真燃烧火焰温度分布。火焰温度分布通过等温线来表示。2 条邻近等温线之间的温度差为 300 K，最外面的等温线表示温度为 1200 K，越往火焰中心，温度越高。假定温度大于 1200 K 的区域为燃烧火焰区域。由图 9 可知，CH 基、H 基对甲烷燃烧火焰影响很明显。当进口混合气中 H 基的浓度  $\omega_H=0.05\%$  时，火焰体积有一定减小，火焰根部靠拢到喷嘴附近。当  $\omega_H$  达到 0.1% 时，火焰体积已明显变小，且火焰根部完全进入喷嘴，形成了回火。当 H 基浓度进一步增加到 0.15% 时，回火更严重。相对比而言，CH 基对甲烷燃烧火焰的影响比 H 基要小一些。CH 基浓度  $\omega_{CH}$  为 0.1% 时，火焰根部向喷嘴靠拢。随着 CH 基浓度增加，火焰根部靠拢趋势越来越明显，且火焰体积逐渐变小。但直到  $\omega_{CH}$  增加到 1%，燃烧火焰始终没有出现回火现象。

仿真结果表明，随着加入的 H 基浓度增加，甲烷火焰出现回火越来越严重。这与实验中火焰回火变化的趋势是一致的。实验结果中，随着放电电压的增加，甲烷离解生成 CH 基越多，同时甲烷火焰回火越来越严重。考虑到 CH 基的生成过程伴随着 H 基生成，即放电电压增加，H 基浓度也相应增加。结合实验和仿真结果，可以认为回火现象是由 DBD 放电时甲烷离解生成的 H 基引起的。

### 4 结论

1) 甲烷经过放电处理后发生了离解，离解产物中有大量的 CH 基。随放电电压和频率增加，甲烷的放电光谱中 CH 基的光谱有明显增强，说明放电使甲烷离解程度加强。

2) 甲烷经放电处理后火焰的组成发生变化, 火焰内 OH 基、CH 基等主要成分随放电电压和频率的增加而增多; 同时在一定电压作用下会发生回火现象。分析认为燃烧火焰内 OH 基、CH 基等中间产物的增加以及回火的现象产生, 是由甲烷离解生成的 CH 基、H 基造成的。

3) CH 基和 H 基对甲烷火焰影响的仿真结果表明, 甲烷的离解产物 CH 基、H 基对燃烧火焰影响很大, 会造成火焰内 OH 基、CH 基浓度变化, 并导致回火。相对于 CH 基, H 基对回火影响更大。仿真结果与实验结果中甲烷离解产物对燃烧的影响趋势是一致的。

### 参考文献

- [1] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 309-323.  
Xu Xueji, Zhu Dingchang. Discharge physics of gas[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996: 309-323(in Chinese).
- [2] Haq S, Somerton C, Tunnicliffe D, et al. An X-ray photoelectron spectroscopy study of the surface layers between diamond crystallites and silicon substrate deposited by microwave-plasma-assisted chemical vapor deposition[J]. *Diamond and Related Materials*. 1993, 2(2-4): 558-561.
- [3] Eliasson B, Hirth M, Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1987, 20: 1421.
- [4] Laroussi M. Sterilization of contaminated matter with atmospheric pressure plasma[J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1996, 24(3): 1188-1191.
- [5] 高旭东, 孙保民, 肖海平, 等. 介质阻挡放电脱除 NO<sub>x</sub> 器的评价方法和运行流量特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(11): 27-30.  
Gao Xudong, Sun Baomin, Xiao Haiping, et al. An evaluation method of dielectric barrier discharge reactor for NO<sub>x</sub> removal and characteristics analysis gas flow rate[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(11): 27-30(in Chinese).
- [6] 周远翔, 程子霞, 严萍, 等. 低温等离子体处理粉尘中二恶英的初步研究[J]. *高电压技术*, 2002(S1): 49-51.  
Zhou Yuanxiang, Cheng Zixia, Yan Ping, et al. Primary research on non-thermal plasmas on toxicity removal of dioxin-contained fly ash[J]. *High Voltage Engineering*, 2002(S1): 49-51(in Chinese).
- [7] Luk Y V B, Ereemeev A P, Nesmeyanov A N. Synthesis of oxygen-containing organic compounds in electric discharges[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1974, 48(4): 531-533.
- [8] 周俊虎, 聂欣, 周志军, 等. 无油点火燃烧器的数值试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004: 24(9): 243-247.  
Zhou Junhu, Nie Xin, Zhou Zhijun, et al. Numerical simulation of oil-free ignition combustor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(9): 243-247(in Chinese).
- [9] Starikovskii A Y. Plasma supported combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005(30): 2405-2417.
- [10] Stange S, Kim Y, Ferreri V, et al. Flame images indicating combustion enhancement by dielectric barrier discharges [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(2): 316-317.
- [11] Rosocha L A, Coates D M, Platts D, et al. Plasma-enhanced combustion of propane using a silent discharge[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(5): LALP-04-136.
- [12] 郭向阳, 何立明, 兰宇丹, 等. 基于化学平衡的等离子体助燃计算与分析[J]. *空军工程大学学报*, 2007, 8(6): 8-11.  
Guo Xiangyang, He Liming, Lan Yudan, et al. Calculation and analysis of plasma assisted combustion based on chemical equilibrium[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2007, 8(6): 8-11(in Chinese).
- [13] 郭向阳, 何立明, 兰宇丹, 等. 非平衡性等离子体对燃烧影响的研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(6): 148-151.  
Guo Xiangyang, He Liming, Lan Yudan, et al. Effect study of non-thermal equilibrium plasma on methane combustion[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2008, 28(6): 148-151(in Chinese).
- [14] 杜宏亮, 何立明, 兰宇丹, 等. 等离子体对氢气/空气混合物燃烧过程影响的数值研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(6): 141-143.  
Du Hongliang, He Liming, Lan Yudan, et al. Numerical simulation of the influence of plasma assisted combustion on hydrogen air intermixture[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2008, 28(6): 141-143(in Chinese).
- [15] 兰宇丹, 何立明, 金涛, 等. 火箭发动机等离子体助燃的计算与分析[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(5): 145-148.  
Lan Yudan, He Liming, Jin Tao, et al. Calculation and analysis on the mechanism of plasma assisted combustion for rocket engine[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2008, 28(5): 145-148(in Chinese).

- [16] 兰柏, 杨嘉祥, 王新掌, 等. 高频高压交流电源的研制[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 183-186.  
Lan Bo, Yang Jiexiang, Wang Xinzhang, et al. Development of high frequency and high voltage AC power supply[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 183-186(in Chinese).
- [17] 邵建设, 严萍, 袁伟群. 大气压空气中同轴介质阻挡放电微放电特性[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 65-68.  
Shao Jianshe, Yan Ping, Yuan Weiqun. Analysis of microdischarge characteristic of coaxial dielectric barrier discharge in atmospheric air[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 65-68(in Chinese).
- [18] 齐冰. 大气压均匀介质阻挡放电以及多针电晕增强放电机制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
Qi Bing. A study on uniform dielectric barrier discharge and enhanced-corona discharge at atmospheric pressure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007(in Chinese).
- [19] 谭世语, 姚芳华. 甲烷等离子体转化的研究进展[J]. 河南化工, 2007(24): 4-7.  
Tan Shiyu, Yao Fanghua. Research progress on conversion of methane by plasma[J]. Henan Chemical Industry, 2007(24): 4-7(in Chinese).
- [20] Erwin D A, Kunc J A. Dissociation and ionization of the methane molecule by nonrelativistic electrons including the near threshold region[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(6): 064906-9.
- [21] 姜春阳, 夏胜国, 邹鑫, 等. 介质阻挡放电边缘电场对甲烷燃烧强化的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 26-30.  
Jiang Chunyang, Xia Shengguo, Zou Xin, et al. Effects of edge electric field in dielectric barrier discharges on methane combustion enhancement[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 26-30(in Chinese).



丁玉柱

收稿日期: 2011-03-18.

作者简介:

丁玉柱(1986), 男, 硕士研究生, 从事高电压新技术等方面的研究;

夏胜国(1968), 男, 博士, 副教授, 研究方向为脉冲功率和等离子体, 本文通讯作者, shgxia@163.com;

王琼芳(1986), 女, 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术的研究;

姜春阳(1986), 男, 硕士研究生, 从事高电压新技术等方面研究;

韩文(1986), 男, 博士研究生, 从事高压电器方面的研究;

何俊佳(1968), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电弧电接触、高电压与绝缘技术及脉冲功率技术领域的教学与研究。

(编辑 胡琳琳)